第46卷 第3期
2023年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 3
Mar. 2023

MSWEP降水产品在黄河流域气象干旱监测中的适用性评价

许昕彤， 朱 丽， 吕潇雨， 郭 浩

（曲阜师范大学地理与旅游学院，山东 日照 276826）

摘 要： 利用多个统计学指标和多个时间尺度的标准化降水指数（Standardized precipitation index，SPI）评估1981—2020年MSWEP（Multi-source weighted-ensemble precipitation）降水产品在黄河流域干旱监测中的准确性，并利用游程理论识别干旱事件并定量化分析其时空特征。结果表明：(1) MSWEP降水产品的月降水与以中国降水分析产品（Chinese precipitation analysis product，CPAP）为代表的地面观测降水的相关性较高，决定系数达到0.9347。(2) MSWEP降水产品可以较好地捕捉多年降水的空间格局和时间演变。(3) 基于MSWEP降水产品计算的SPI一般可以重现基于CPAP计算的SPI的格局，但是相关性因地区而异。在捕捉干湿状况方面，MSWEP降水产品在黄河流域中下游表现较好，但在黄河源区的效果较差，相关系数低于0.5。值得注意的是，MSWEP降水产品捕捉干湿变化的能力随SPI时间尺度的增加而降低。(4) MSWEP降水产品在黄河流域中下游的表现明显优于上游。(5) MSWEP降水产品能够有效捕捉持续时间、烈度和严重度等干旱事件特征。总体来讲，MSWEP降水产品适用于黄河流域中下游的干旱监测，但在黄河源区地形复杂地区的干旱监测应用时，需要进一步修正其降水高估误差。

关 键 词： 干旱监测；MSWEP降水产品；标准化降水指数；应用评价；黄河流域

文章编号： 1000－6060(2023)03－0371－14(0371～0384)

干旱是一种复杂的极端气候现象。与其他自然灾害相比，干旱发展缓慢、历时长、影响范围广，影响涉及农业、生态和社会发展等不同领域。干旱没有统一的定义，但根据其特征和影响可以分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱4种类型[1-2]。

为有效识别干旱事件，需要建立或者选择适用于研究区的干旱指数[3]。干旱指数用于综合表示气象或下垫面的干湿状况[4]。目前，帕默尔干旱指数（Palmer drought severity index，PDSI）[5]、标准化降水指数（Standardized precipitation index，SPI）[6]、标准化降水蒸散发指数（Standardized precipitation evapotranspiration index，SPEI）[7]几种干旱监测指数应用比较广泛。PDSI是基于物理机制的气象干旱指数之一，该指数综合考虑了降水、蒸发蒸腾和土壤水分条件对干旱的影响，能够清晰地表征干旱的成因、程度以及持续时间等特点。但是PDSI对数据要求较高，计算复杂，而且难以反映短期干旱的特征[4,8-9]。SPI是一种表征时段降水量匮乏状态的无量纲指数，具有数据要求低、计算简单等优点，反映干旱强度和持续时间的能力较强。SPI能够反映不同时间尺度和区域的干旱状况，被世界气象学会、中国气象局等众多机构列为业务化干旱监测指标，同时得到众多研究者的青睐[10-11]。本文研究目的是评价MSWEP(Multi-source weighted-ensemble precipitation）降水产品的适用性，所以选择主要依赖降水数据、

收稿日期： 2022-06-19； **修订日期：** 2022-07-17
基金项目： 国家自然科学基金（42001363）资助
作者简介： 许昕彤（2000-），女，本科，主要从事干旱监测研究. E-mail: xxt000927@126.com
通讯作者： 郭浩（1989-），男，博士，副教授，主要从事干旱监测、遥感降水定量反演等研究. E-mail: guohao@qfnu.edu.cn

计算简便的SPI进行分析。

干旱监测分为常规站点干旱监测和遥感干旱监测2种类型。站点观测数据具有数据记录序列长、准确性高等优势，基于站点的干旱监测往往被当作其他数据干旱监测的标准。然而，站点观测受到下垫面性质的影响，部分地区存在站点稀少、分布不均、数据缺乏空间代表性等问题，难以获得覆盖全区长时序的降水数据[4,12-14]。随着遥感降水反演技术的发展，遥感反演降水产品精度不断提高，其拥有覆盖面广、时空分辨率高、易获取等特点，成为降水监测的重要数据来源。当前，国内外已经开展了众多降水观测任务，并生产了一系列卫星降水产品，比较有代表性的有热带降雨测量任务（Tropical rainfall measuring mission，TRMM）及其衍生的TMPA（TRMM multi-satellite precipitation analysis）系列产品[15]、全球降水测量计划（Global precipitation measurement，GPM）[13]及其衍生的IMERG（Integrated multi-satellite retrievals）和GSMaP（Global satellite mapping of precipitation）系列产品、美国气候预测中心变形技术（CPC MORPHing technique，CMORPH）等[16]。

降水产品种类繁多、特点各异，降水分布又会受到地形、气候等众多因素的影响，所以需要对其进行误差评价，以选择精度更高、适用性更强的降水产品。MSWEP多源集成降水产品是一套全球0.1°空间分辨率、3 h时间分辨率的格网化降水产品，具有时间尺度长（>40 a）、时间滞后性短、空间分辨率高等优点[17-18]。Xu等[19]基于586个气象站点的观测降水数据评估了MSWEP V2.1在中国干旱监测中的适用性，发现该产品在中国东部的表现明显优于西部。基于站点资料，Guo等[20]对3种长时间序列遥感降水产品在中国西北地区干旱监测的表现进行了系统评估，结果显示在识别干旱事件与表征干旱特征方面MSWEP降水产品表现最优。董晓华等[11]比较了3种降水产品在淮河流域干旱监测中的表现，验证得到在降水量的测量、极端短缺降水量的监测等功能上，MSWEP降水产品均取得最高精度，且计算的SPI对不同级别旱情的判定更为准确，整体表现优于其他产品，体现出较大的应用潜力。

黄河流域横贯中国的东中西部，是我国重要的经济地带和生态屏障带。由于地域范围广、地表形态复杂、降水时空分布不均，干旱灾害频发，严重影响了流域内人民生产生活和地区经济发展[21-22]。在黄河流域生态保护和高质量发展的战略背景下，该区域的干旱监测工作是十分必要的。以中国气象局发布的站点插值网格降水产品——中国降水分析产品（Chinese precipitation analysis product，CPAP）为标准数据，本文利用常规相关性等统计指标对MSWEP降水产品进行了降水量和干湿变化误差评价。在此基础上结合SPI干旱指数和游程理论识别干旱事件并对干旱事件特征进行定量化描述，以期对黄河流域干旱监测研究提供科学参考，为黄河流域的干旱防灾减灾提供决策支持。

1 研究区概况

黄河流域（32°~42°N，95°~120°E）地势西高东低，流域范围在我国北方横跨三大地理阶梯，流域内地表起伏显著，地貌复杂，总面积79.3×10^4 km^2（图1）[22]。受极地高压、青藏高压和副高压影响，黄河流域内降水空间分布不均，是我国典型的干旱、半干旱、半湿润气候区，水资源条件匮乏，容易发生干旱[23-24]。

2 数据与方法

2.1 研究数据

本文以国家气象信息中心和中国气象局制作的0.5°×0.5°日尺度网格化降水分析产品（China daily precipitation analysis product，CPAP）作为地面参考数据，数据来源于国家气象科学数据共享服务平台（http://data.cma.cn）。研究采用1981—2020年共40 a的MSWEP V2.8降水数据（http://www.gloh2o.org）。该数据时空分辨率为3 h/0.1°。由于MSWEP降水产品与CPAP时空分辨率不同，因此为了能够直接比较，分别将2个产品累计生成月尺度数据，并将MSWEP重采样为空间分辨率为0.25°的降水数据集。

2.2 研究方法

2.2.1 标准化降水指数（SPI） SPI由McKee等于1993年提出，数值由指定时间段内降水量与平均值的差除以标准偏差而得[6]。SPI负值表示某一时间段降水量低于该地区气候平均水平，即表示干旱状态；反之，SPI正值表示某一时间段降水量高于该地区气候平均水平，即表示湿润状态[6,25]。由于降水量

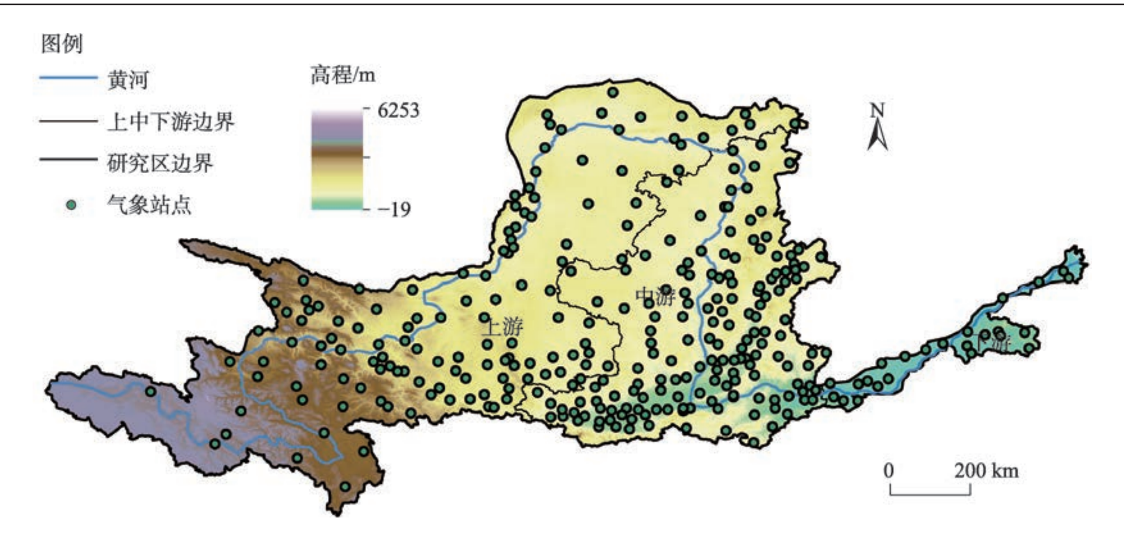


图1 黄河流域气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Yellow River Basin

一般不呈正态分布，因此SPI基于某时段内降水量，利用Γ分布将其拟合后进行正态标准化处理，最终通过标准化降水累积频率来划分干旱等级。具体计算方法如下[26]：

$$\mathrm{SPI}=S\left\{t-\frac{(c_2t+c_1)t+c_0}{\left[(d_3t+d_2)t+d_1\right]t+1.0}\right\} \tag{1}$$

式中：$t=\sqrt{\ln\frac{1}{F^2}}$，$F$为符合条件的降水事件的概率，且当$F>0.5$时，$F$值取$1.0-F$，$S=1$；当$F\leqslant0.5$时，$S=-1$。$c_0$、$c_1$、$c_2$和$d_1$、$d_2$、$d_3$为将$\Gamma$分布概率进行正态标准化处理时近似求解得到的参数，其中$c_0=2.515517$，$c_1=0.802853$，$c_2=0.010328$，$d_1=1.432788$，$d_2=0.189269$，$d_3=0.001308$。F由概率密度积分公式计算得到：

当降水量不为0时，对于某一年的降水量(x_0)，求出某时段内降水样本x小于x_0事件的概率为：

$$F=\int_0^{x_0}\frac{1}{\beta^\gamma\Gamma(\gamma)}x^{\gamma-1}e^{\frac{-x}{\beta}}dx,\quad 0<x<x_0 \tag{2}$$

当降水量为0时：

$$F=\frac{m}{n},\quad x=0 \tag{3}$$

式中：m为降水量为0的样本数；n为总样本数；$\beta(>0)$、$\gamma(>0)$分别为尺度和形状参数，其最佳估计值可由极大似然估计法求得：

$$\hat{\gamma}=\frac{1+\sqrt{1+\frac{4A}{3}}}{4A} \tag{4}$$

$$\hat{\beta}=\frac{\bar{x}}{\hat{\gamma}} \tag{5}$$

$$A=\lg\bar{x}-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lg x_i \tag{6}$$

式中：$\hat{\beta}$、$\hat{\gamma}$分别为β和γ的估计值；x_i为降水量资料样本；$\bar{x}$为降水量样本序列平均值；A为极大似然法计算的中间变量；n为总样本数。

根据降水的累积概率可以将SPI划分为5个等级(表1)。通常认为1个月时间尺度的SPI表达气象干旱，3个月和6个月时间尺度的SPI反映地表土壤水分的盈亏，表达农业干旱，12个月时间尺度SPI表达水文干旱[27]。为分析MSWEP降水产品反馈干湿状况的监测误差，本研究分别计算1981—2020年1、3、6、12个月时间尺度的SPI序列，为方便描述将其分别表示为SPI1、SPI3、SPI6和SPI12。同时，利用SPI3进行黄河流域干旱事件特征分析[28-29]。

表1 基于标准化降水指数(SPI)的干旱等级划分

Tab. 1 Drought classification based on standardized precipitation index (SPI)

SPI值	干旱等级
SPI≤−2.0	特旱
−2.0<SPI≤−1.5	重旱
−1.5<SPI≤−1.0	中旱
−1.0<SPI≤−0.5	轻旱
SPI>−0.5	无旱

2.2.2 评价指标 研究采用相对偏差(Relative bias, RB)、均方根误差(Root mean square error, RMSE)、

相关系数(Correlation coefficient,CC)等传统误差指标对MSWEP降水产品降水量及干湿变化估计进行误差评价,以判断其在干旱监测中的适用性。RB和RMSE用于表示产品估计值与参考数据的偏差程度,越接近0代表数据精度越高;CC指皮尔逊相关系数,用于量化产品估计值和参考数据之间线性相关程度,CC的绝对值越接近1,代表数据序列间相关性越高。RB、RMSE、CC的计算公式如下:

$$RB = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - G_i)}{\sum_{i=1}^{n} G_i} \times 100\% \tag{7}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - G_i)^2} \tag{8}$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^{n}(G_i - \bar{G})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(G_i - \bar{G})^2 \sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2}} \tag{9}$$

$$\bar{G} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} G_i,\quad \bar{P} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i$$

式中:G_i、$\bar{G}$分别为参考实测数据及其平均值;P_i、$\bar{P}$分别为遥感降水数据及其平均值;n为样本容量。

2.2.3 游程理论 游程理论是一种时间序列分析算法[30]。本文基于SPI时间序列,结合游程理论逐像元识别干旱事件并对干旱特征进行定量化描述。由于持续时间过短的干旱事件影响一般较低,结合黄河流域气候和农业的特点,研究选择代表季节性干旱的SPI3定义干旱事件[25,31]。即SPI持续3个月小于-0.5时为一次干旱事件(图2)。

本研究基于游程理论对黄河流域逐栅格进行干旱事件识别,并计算1981—2020年干旱事件发生的总频次(Drought frequency,DF)。一旦确定干旱事件,即可对干旱事件的特征进行定量化描述[20]。这些特征主要包括干旱历时(Drought duration,DD)、干旱严重度(Drought severity,DS)、干旱烈度(Drought intensity,DI)和干旱峰值(Drought peak,DP)。干旱历时即干旱结束与开始时间的差值;干旱严重度指干旱发生期间SPI累加值的绝对值;干旱烈度为干旱严重度与干旱历时的比值,描述不同干旱事件的强烈程度;干旱峰值即干旱发生期间SPI最小值的绝对值。为方便进行干旱特征的空间对比,逐栅格计算平均干旱历时(Mean drought duration,MDD)、平均干旱严重度(Mean drought severity,MDS)、平均干旱烈度(Mean drought intensity,MDI)以及平均干旱峰值(Mean drought peak,MDP),计算公式如下:

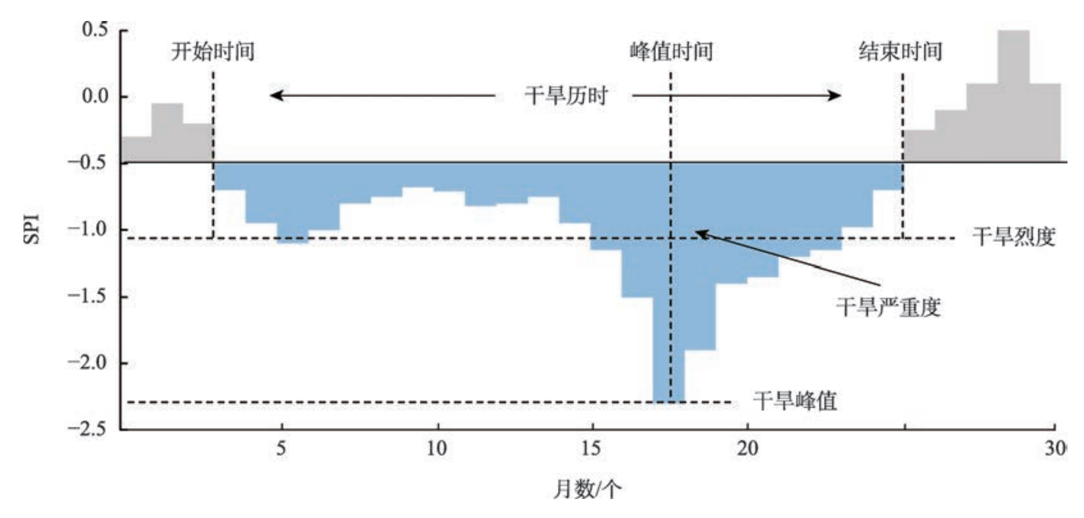
$$MDD = \frac{\sum_{i=1}^{DF} DD}{DF},\quad DD = t_1 - t_0 \tag{10}$$

$$MDS = \frac{\sum_{i=1}^{DF} DS}{DF},\quad DS = \left|\sum_{i=1}^{DD} Z_i\right| \tag{11}$$

$$MDI = \frac{\sum_{i=1}^{DF} DI}{DF},\quad DI = \frac{DS}{DD} \tag{12}$$

$$MDP = \frac{\sum_{i=1}^{DF} DP}{DF},\quad DP = \left|Z_{min}\right| \tag{13}$$

式中:t_1为干旱事件结束时间;t_0为干旱事件开始时间;i为干旱事件期间的1个月;Z_i为某场干旱事件指定月



注:SPI为标准化降水指数。下同。

图2 游程理论示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the run theory

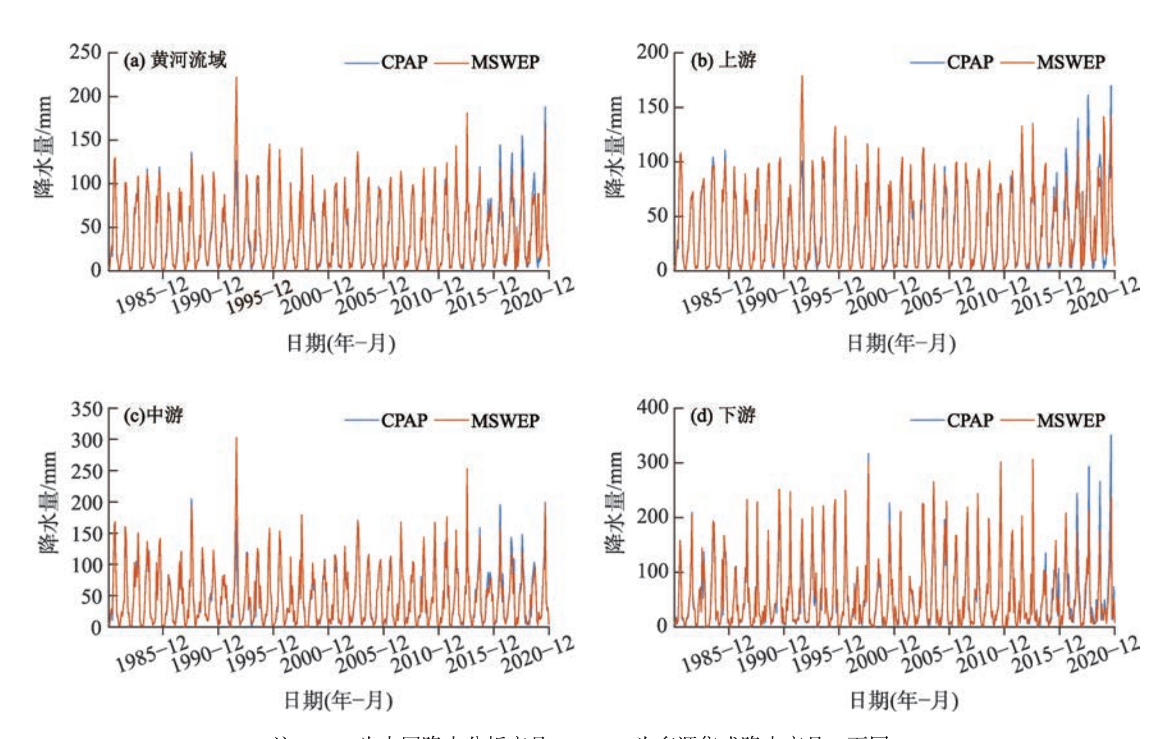
份i的SPI值；Z_{min}为某场干旱事件期间SPI的最小值。

3 结果与分析

3.1 MSWEP降水产品数据精度评估

3.1.1 MSWEP降水产品的时空分布 为了直观比较MSWEP降水产品与CPAP在黄河流域不同分区的数值差异，研究分别基于MSWEP降水产品和CPAP计算研究时段内黄河流域以及黄河上中下游地区的月尺度降水量均值，绘制了时间序列图(图3)。总体上来讲，MSWEP降水数据与CPAP数据无明显偏差，能够较好地捕捉到月尺度降水量的周期性变化，在黄河流域的不同区域都显示出相似的波动模式。但其在不同时期、不同范围的研究区内对月降水量随时间变化的捕捉能力存在一定差异，比如1992年，虽然MSWEP降水产品成功地捕捉到降水量的变化趋势和极值点，但是对降水量峰值的监测存在偏高现象。

图4比较了1981—2020年基于2组数据的月降



注：CPAP为中国降水分析产品；MSWEP为多源集成降水产品。下同。

图3 1981年1月—2020年12月MSWEP降水产品和CPAP的月降水量时间序列

Fig. 3 Time series of MSWEP precipitation product and CPAP monthly precipitation from January 1981 to December 2020

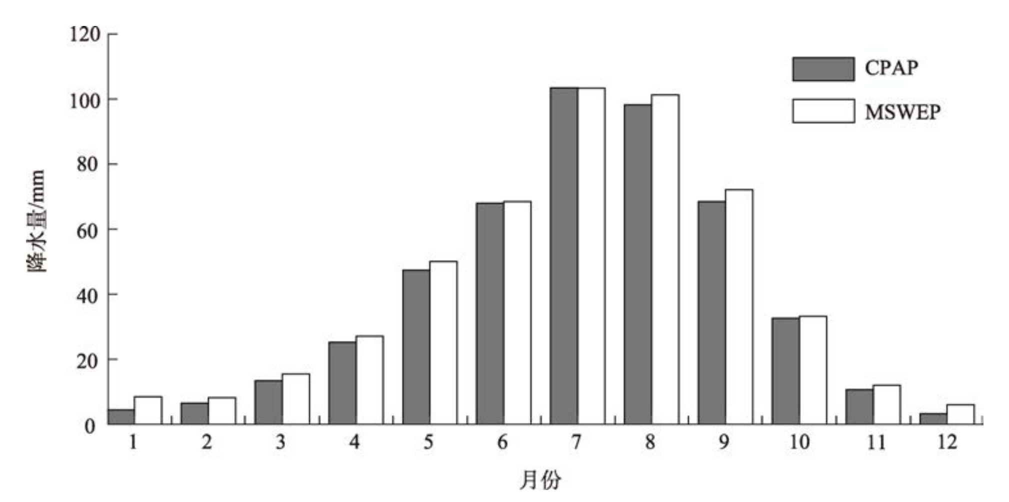


图4 1981年1月—2020年12月MSWEP降水产品和CPAP的月降水量均值年内变化

Fig. 4 Intra-annual variation of monthly mean precipitation of MSWEP precipitation product and CPAP from January 1981 to December 2020

水量的年内变化，结果显示MSWEP降水产品在捕捉年内月降水周期上表现良好。具体来讲，MSWEP降水产品对降水量普遍存在高估，但不同时间高估程度不同，在降水量较多的7月则出现低估。这可能与流域内气候区众多，降水量的时空差异较大有关。

对CPAP(图5a)和MSWEP(图5b)降水数据多年平均月降水量进行空间变化分析可知，MSWEP降水产品能够较为精准地捕捉到降水量由东南向西北递减的空间格局，尤其是在我国400 mm等降水量线附近界限清晰。MSWEP降水产品监测到了黄河流域中上游南部的高降水量区域，但在高降水量区域的边界处和流域下游存在一定范围的高估。

3.1.2 MSWEP降水产品的精度检验 根据黄河流域及流域不同分区MSWEP降水产品和CPAP月降水量序列值(图3)绘制了黄河流域月均降水量的散点图(图6)。结果表明，MSWEP降水产品与CPAP具有良好的一致性，二者决定系数(R^2)为0.9347，线性拟合回归线斜率达0.9847。同时也发现个别监测值出现较高程度偏差，导致RMSE较大，达到216.7 mm·月$^{-1}$。流域内其他分区也显示出同样的高R^2和高RMSE的特征，如流域下游R^2达0.9361，同时RMSE也达347.4 mm·月$^{-1}$。从分区来看，MSWEP降水产品在黄河流域中游表现最佳，R^2最高(0.9471)，高偏差点最少，这与图3展示的结果一致。

进一步分析MSWEP降水产品在空间上的精度，研究以黄河流域研究期内480个月的CPAP降水数据为参照，计算MSWEP降水产品的RB、CC和RMSE 3个统计指标，并绘制其空间分布图(图7)。统计分析发现，CC值大于0.8的地区面积达到流域整体面积的87%，表明MSWEP降水产品估算降水量的能力在黄河流域的大部分地区表现良好(图7b)。偏差主要出现在黄河源区，CC值低至0.2，RMSE达80 mm·月$^{-1}$(图7b~c)。这可能是综合原因造成的，例如黄河源区站点稀疏，CPAP无法有效反馈真实降水量分布，或MSWEP降水产品受复杂地形影响，无法有效反演该地区降水。需要注意的是黄河源区附近低CC与高RMSE的特征和RB的空间特征不一致，这可能是由于研究数据的长时间序列特征，40 a间MSWEP降水产品高估与低估交替出现，导致不同时间降水量的高估和低估相抵消，进而造成RB较低。

3.1.3 基于MSWEP降水产品计算的SPI精度验证 研究利用CC和RMSE评估1981年1月—2020年12月基于MSWEP降水产品和CPAP计算得到的不

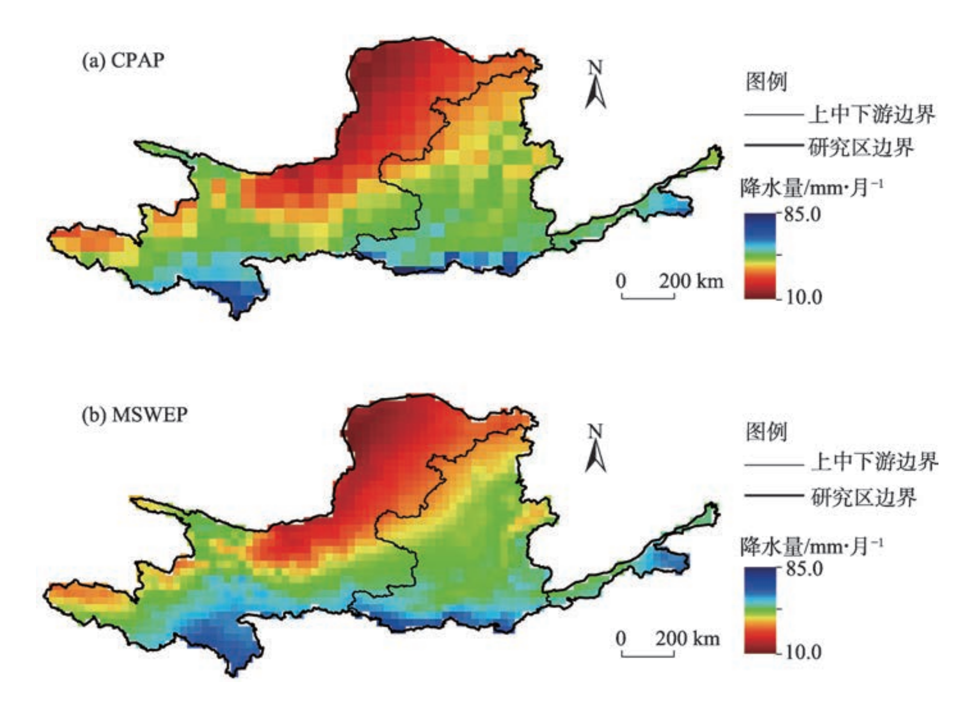
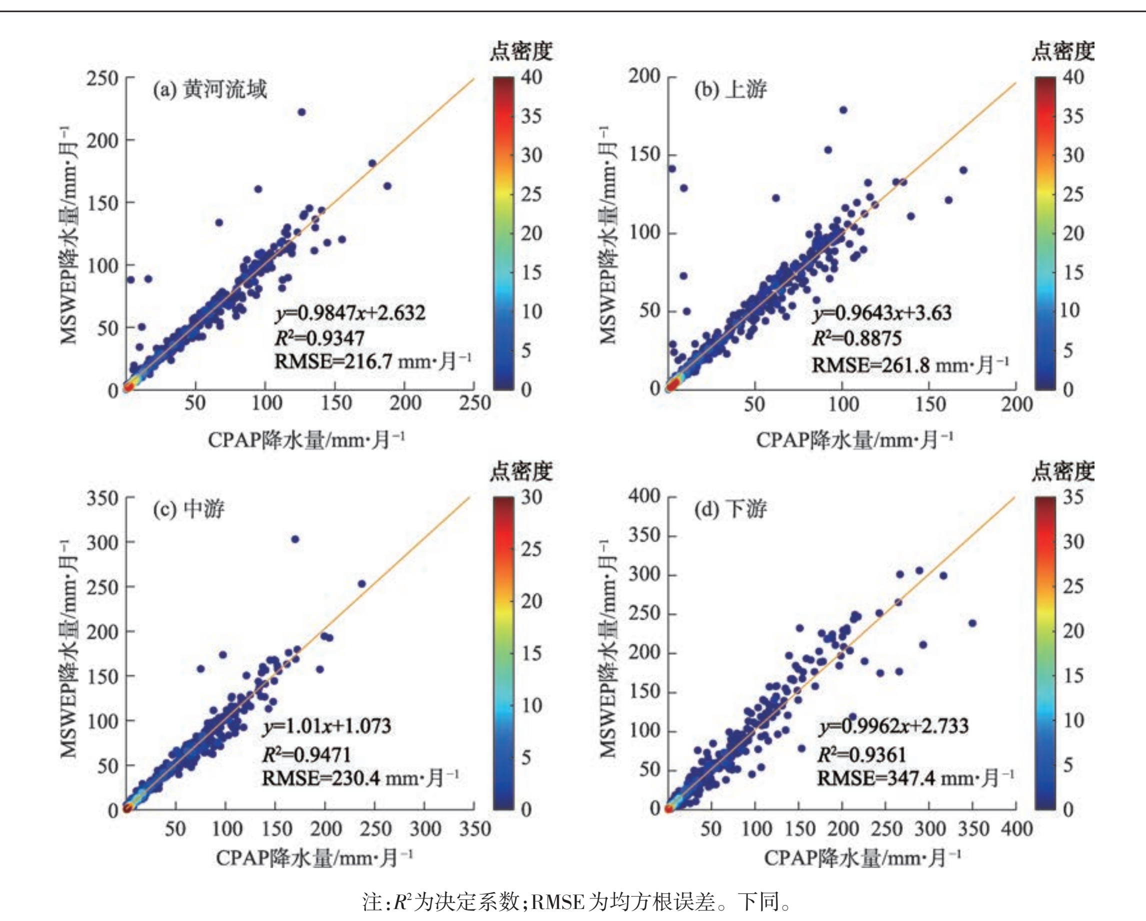


图5 黄河流域CPAP和MSWEP降水产品40 a月均降水量空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of 40 years monthly mean precipitation derived from CPAP and MSWEP precipitation product in the Yellow River Basin



注：R^2为决定系数；RMSE为均方根误差。下同。

图6　黄河流域不同分区CPAP和MSWEP降水产品40 a月降水量均值散点图

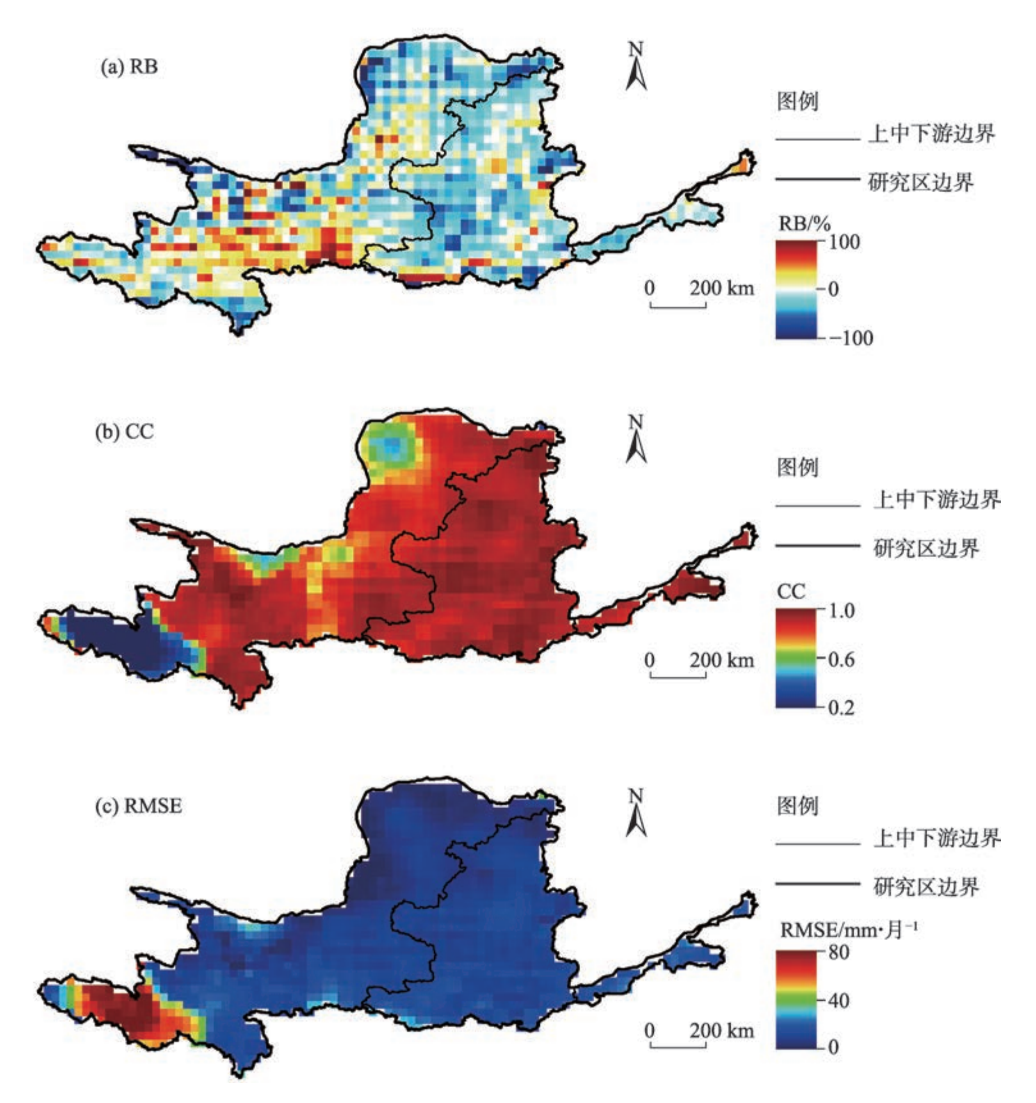
Fig. 6　Scatter plots of MSWEP precipitation product and CPAP monthly precipitation values in different regions of the Yellow River Basin

同时间尺度SPI精度的空间特征(图8)。结果显示在不同时间尺度下，CC和RMSE的空间格局在流域大部分地区是相似的。随着时间尺度的增加，流域中下游CC逐渐降低，RMSE逐渐提高。总体而言，基于MSWEP降水产品和CPAP的SPI在黄河流域的中下游具有良好的一致性，这与对降水量的评估结果一致，表明降水量估算的误差可能会直接影响SPI的准确性。相关性不佳的地区仍然出现在流域上游，具体来说，在所有时间尺度上，上游大通河和湟水流域CC均很低，RMSE也较高。差异的原因可能有该区域复杂的地形以及站点稀疏导致的降水量误差等。

为进一步评价MSWEP降水产品在干旱监测应用中的适用性，本研究对比分析了基于MSWEP降水产品和CPAP计算的不同时间尺度SPI的时间变化(图9)。由结果可以看出，不同时间尺度的SPI呈现出相似的波动模式。基于MSWEP降水产品的SPI在捕捉不同时间尺度的SPI趋势和干湿变化特征方面表现良好，但在干湿强度捕捉方面存在误差。与1992年MSWEP降水产品对降水量的高估对应(图3)，不同时间尺度的SPI在1992年也发生显著高估。随着时间尺度的增大，SPI曲线振荡频次降低幅度减弱，基于MSWEP降水产品的SPI时间序列与基于CPAP的参照SPI振荡幅度的差异愈加明显，说明MSWEP降水产品捕捉干湿变化幅度的能力会随着时间尺度的增加有所降低。这主要是由于SPI基于不同时间尺度累积降水量与历史平均水平对比反馈干湿状况，时间尺度越长，累积降水量越多，MSWEP降水产品在对应时期的误差累积越大。

3.2　基于MSWEP降水产品计算的SPI干旱监测分析

3.2.1　SPI干旱监测的空间分析　本文利用基于MSWEP降水产品和CPAP计算的3个月时间尺度SPI和游程理论提取了黄河流域1981—2020年的干旱事件，并逐一计算了干旱事件的历时、烈度、严重



注:RB为相对偏差;CC为皮尔逊相关系数;RMSE为均方根误差。下同。

图7 MSWEP降水产品精度评价指标的空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of performance indices of MSWEP precipitation product

度以及峰值。由于不同地区发生的干旱事件频次多少不一致,为分析MSWEP降水产品干旱监测应用的空间分布情况,本文进一步计算不同干旱事件特征(历时、烈度、严重度和峰值)的平均值,并分别绘制了基于2组数据提取的平均干旱特征的空间分布图以及干旱特征差值的空间分布图(图10)。

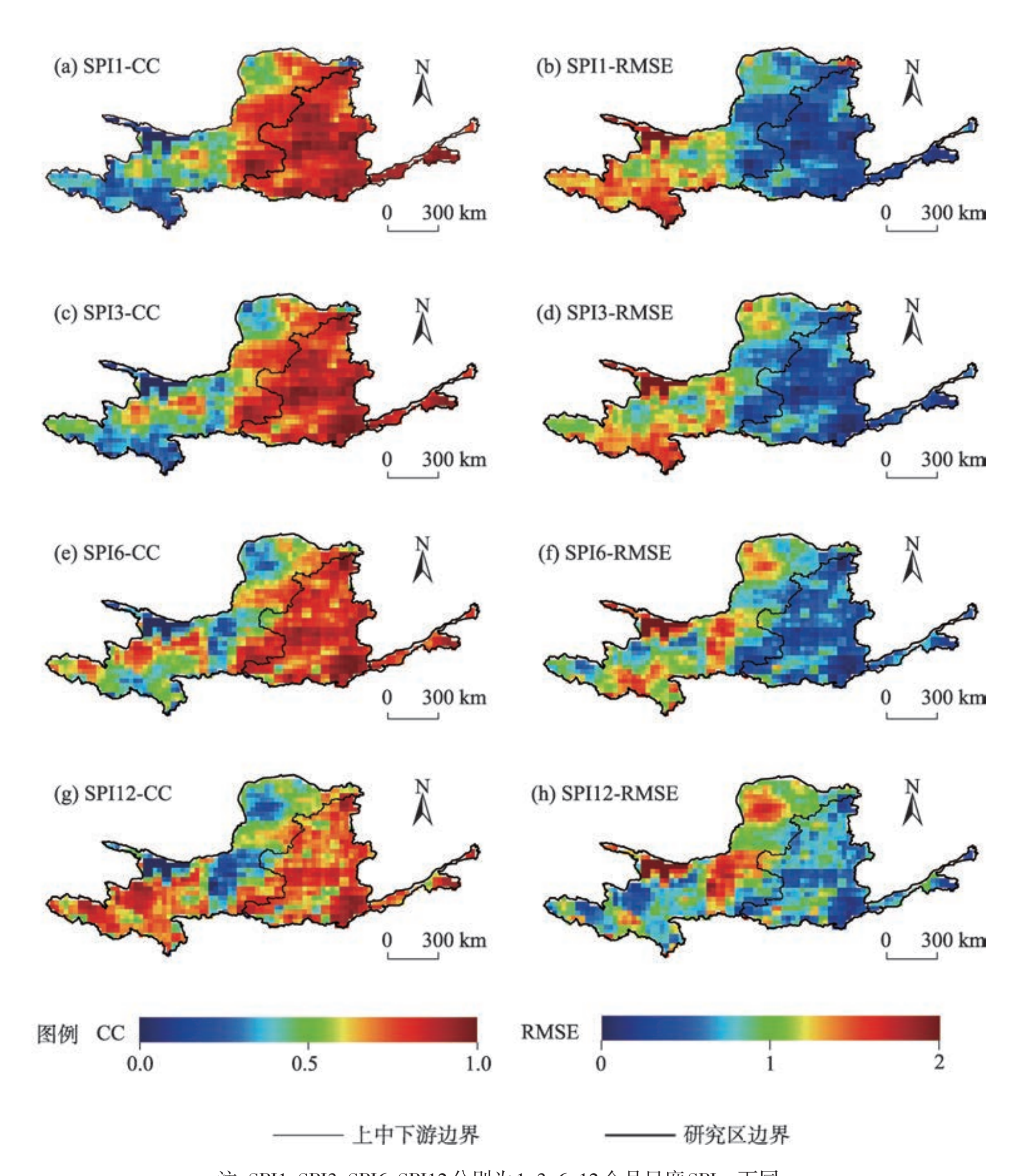
从平均干旱历时的空间分布(图10a~c)可以看出,MSWEP降水产品倾向于低估干旱持续时间,比如在流域上中游交界的陕西省中部平均干旱历时出现明显低估,差值达1.5个月。类似的,MSWEP降水产品整体低估干旱严重度(图10d~f),该低估主要归因于其对干旱历时的低估。在流域中游中部和南部,MSWEP降水产品出现对干旱严重度的高估,该高估现象与对平均烈度的高估表现一致(图10g~i)。平均干旱峰值的空间分布(图10j~l)显示,在黄河源区附近MSWEP降水产品识别出的平均干旱峰值显著低于CPAP,差值达0.5,这与MSWEP降水产品对干湿状况的低估相一致。由此可见,MSWEP降水产品在黄河源区捕捉干旱峰值的能力较弱。

3.2.2 典型干旱事件分析 不同干旱事件特征的影响不同。为进一步评价MSWEP降水产品对干旱特征空间分布和时间变化等方面的监测能力。本研究选取了具有不同特征的3个典型干旱事件进行分析(表2),分别记为DE1、DE2、DE3。

第一个干旱事件发生于1986年9—11月,持续时间短(仅3个月)但强度大,干旱烈度为1.17,严重度为3.51,峰值达1.24。MSWEP降水产品准确捕捉到干

旱历时和峰值时间，但对干旱烈度、严重度和峰值存在一定高估，烈度和严重度均高估11%，峰值高估9%。

第二个干旱事件发生于1997年6—12月，烈度（0.92）和峰值（1.22）相对较低，但干旱历时长达7个



注：SPI1、SPI3、SPI6、SPI12分别为1、3、6、12个月尺度SPI。下同。

图8 基于MSWEP降水产品计算的SPI的精度评价指标的空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of performance indices of SPI based on MSWEP precipitation product

表2 典型干旱事件特征

Tab. 2 Features of typical drought events

干旱事件	降水产品	起止时间	峰值时间	历时/个月	烈度	峰值	严重度
DE1	CPAP	1986年9—11月	1986年11月	3	1.17	1.24	3.51
	MSWEP	1986年9—11月	1986年11月	3	1.31	1.36	3.93
DE2	CPAP	1997年6—12月	1997年10月	7	0.92	1.22	6.41
	MSWEP	1997年6—12月	1997年10月	7	0.93	1.23	6.53
DE3	CPAP	1998年10月—1999年3月	1999年2月	6	1.35	2.27	8.09
	MSWEP	1998年10月—1999年3月	1999年2月	6	1.13	1.90	6.79

注：DE1、DE2、DE3分别为第1、2、3个典型干旱事件；CPAP为中国降水分析产品；MSWEP为多源集成降水产品。

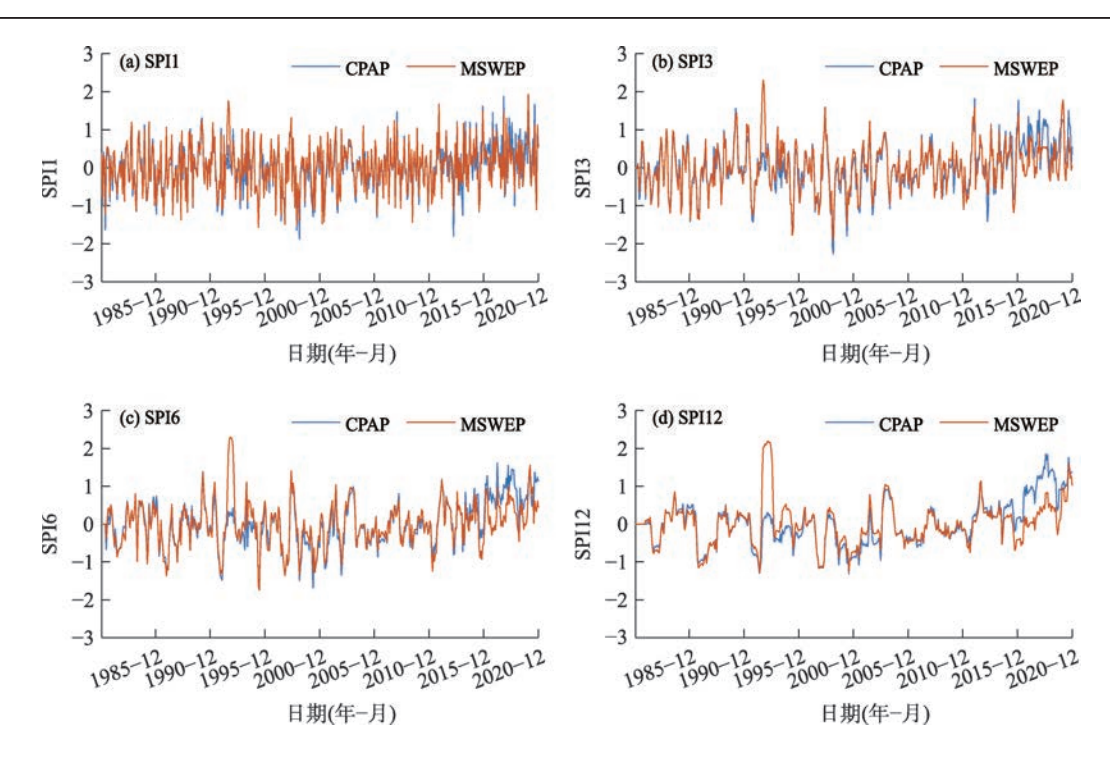
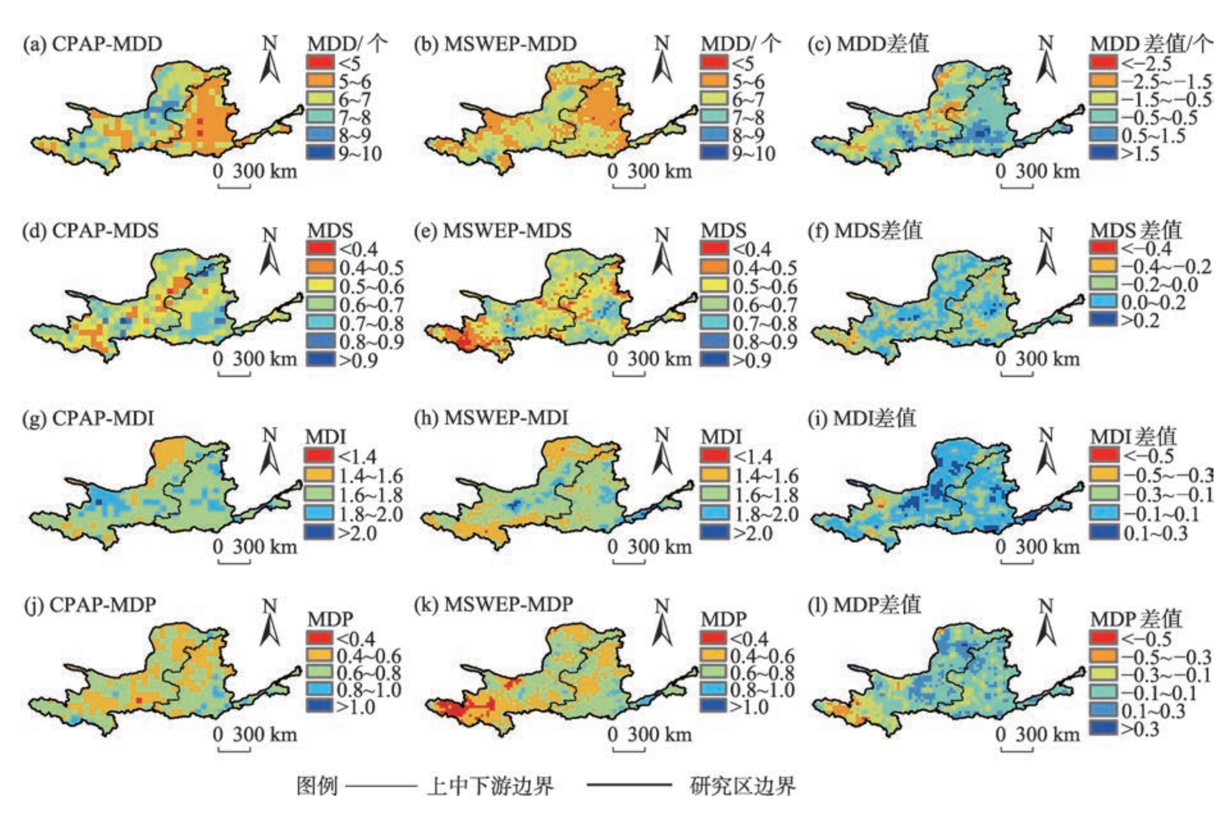


图9 基于MSWEP降水产品和CPAP的SPI在黄河流域不同时间尺度下的时间变化

Fig. 9 Time variation of SPI based on MSWEP precipitation product and CPAP at different timescales in the Yellow River Basin



注:MDD、MDS、MDI、MDP分别为平均干旱历时、平均干旱严重度、平均干旱烈度、平均干旱峰值。

图10 基于MSWEP降水产品与CPAP的SPI指标监测的干旱特征的空间分布

Fig. 10 Spatial distributions of drought characteristics based onSPI estimated by MSWEP precipitation product and CPAP

月，导致严重度较高(6.41)。3次干旱事件中MSWEP降水产品在本次事件表现最佳，不仅准确捕捉到干旱的起止和峰值时间，对干旱烈度、严重度和峰值的监测偏差也不大，均仅高估1%。

第三个干旱事件发生于1998年10月—1999年3月，是研究期最严重的一次干旱。本次事件历时6个月，严重度(8.09)和烈度(1.35)均高，1999年2月干旱峰值达2.27。MSWEP降水产品准确捕捉到干旱的起止时间，但低估了干旱烈度(19%)和峰值(19%)。

3次典型干旱事件SPI峰值的空间分布如图11所示。研究分别基于MSWEP降水产品和CPAP的峰值SPI计算了3次事件不同等级干旱的面积占比，用环形图表示。可以看出MSWEP降水产品可以捕捉到整体的干旱模式，但在捕捉不同强度干旱的布局上仍有改进空间。对于严重干旱而言，MSWEP降水产品在3次事件中表现不一，高估了1986年11月(15%)而低估了1999年2月(5%)的极端和严重干旱面积。另一方面，MSWEP降水产品还高估了这2次事件的湿润面积(16%)，高估分别出现在流域北部和黄河源区。

4　讨 论

MSWEP降水产品在黄河流域中下游干旱监测中具有很好的应用潜力，但在黄河源区表现差强人意，需要进一步提高其对降水和干湿变化的反馈精度。这可能由综合原因导致，如黄河流域中下游地势平坦，而上游地处青藏高原，地表形态复杂，导致

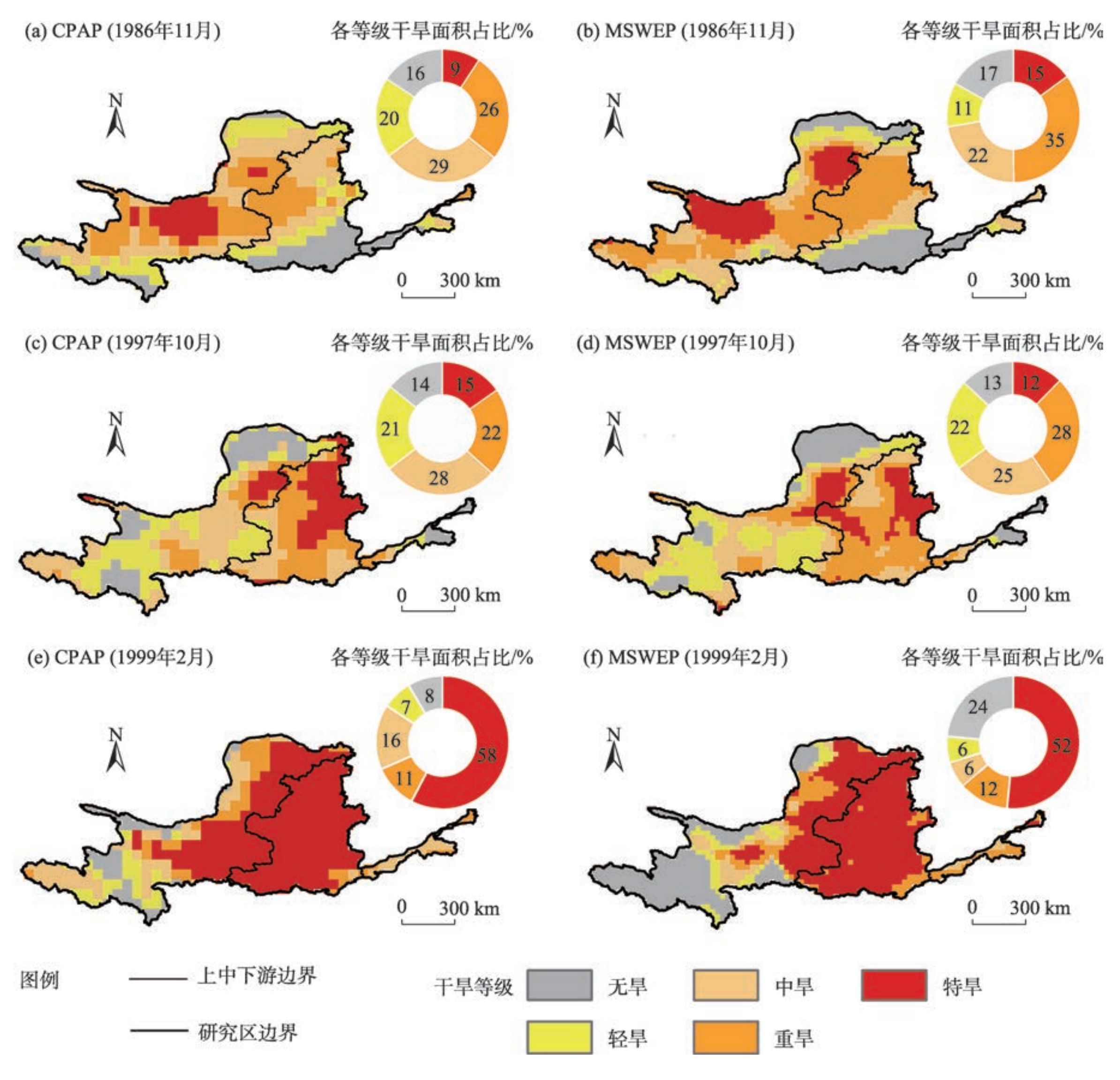


图11　典型干旱事件峰值时间CPAP和MSWEP降水产品不同等级干旱的空间模式

Fig. 11　Spatial patterns of droughts at different levels of CPAP and MSWEP precipitation product at the peak time of the selected drought events

MSWEP降水产品数据质量较低;青藏高原地区气象站点稀疏,CPAP误差较大,无法有效反馈真实降水分布等。这与MSWEP在中国范围的表现一致[19,32]。

然而由于标准数据不同,不同研究中MSWEP降水产品的表现也存在一定差异。与以气象站点数据为参考的遥感降水产品适用性评价研究相比,以站点插值降水产品为标准数据覆盖研究全区而非局限于特定站点,区域差异表现更为显著,能够反映区域整体的降水特征并全面评估遥感降水产品的整体表现,一定程度上弥补了气象站点空间分布稀疏不均导致区域资料缺失的问题。但同时站点插值产品本身也会受到站点数据及插值方法等的影响产生误差,随着站点插值技术发更新与发展,可以获得更为精确的插值降水产品。

5 结 论

本文以评价多源集成降水产品MSWEP降水产品在黄河流域干旱监测的适用性为目的,以站点插值网格降水产品CPAP为标准数据,结合多种精度评价指标对MSWEP降水产品在黄河流域1981年1月—2020年12月的月尺度降水量数据的精度进行评价,通过SPI及游程理论分析了MSWEP降水产品在干湿变化和干旱特征捕捉能力方面的表现。主要结论如下:

(1) MSWEP降水产品总体表现较好,能够有效反馈月降水量的基本时间变化和空间分布特征,可以有效获取到不同时间尺度SPI的时间变化特征,基本满足黄河流域干旱监测需要。

(2) MSWEP降水产品降水量监测误差存在明显的空间差异,其在中下游精度较高,而在上游地形复杂地区的降水量精度差强人意。从时间变化来看MSWEP降水产品在个别时期(如1992年)对降水量存在明显高估误差和一定低估(如2015年)。

(3) 在干湿状况方面,基于MSWEP降水产品的SPI总体表现良好,不仅可以准确识别干旱的发生时间和结束时间,而且可以合理反映干旱时空特征。空间上MSWEP降水产品的SPI在流域的上游精度偏低,但在中下游表现出色。在典型干旱事件的监测上,MSWEP降水产品可以准确捕捉到干旱的起止及峰值时间,但对干旱强度存在不同程度的高低估。空间上MSWEP降水产品可以捕捉到整体的干旱模式,但在捕捉不同强度干旱的布局上仍有改进空间。

参考文献(References)

[1] Society A M. Meteorological drought-policy statement[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(5): 847-849.

[2] 邓梓锋, 吴旭树, 王兆礼, 等. 基于GRACE重力卫星数据的珠江流域干旱监测[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 179-187. [Deng Zifeng, Wu Xushu, Wang Zhaoli, et al. Drought monitoring based on GRACE data in the Pearl River Basin, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(20): 179-187.]

[3] 卫林勇, 江善虎, 任立良, 等. IMERG卫星降水产品在中国的干旱监测效用评估[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 161-169. [Wei Linyong, Jiang Shanhu, Ren Liliang, et al. Evaluation of drought monitoring in China using IMERG satellite precipitation products[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(2): 161-169.]

[4] 侯英雨, 何延波, 柳钦火, 等. 干旱监测指数研究[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 892-897. [Hou Yingyu, He Yanbo, Liu Qinhuo, et al. Research progress on drought indices[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(6): 892-897.]

[5] Palmer W C. Meteorological drought[R]. Washington: US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.

[6] Mckee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology. Boston: American Meteorological Society, 1993: 179-184.

[7] Vicente-serrano S M, Beguería S, López-moreno J. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.

[8] Alley W M. The Palmer drought severity index: Limitations and assumptions[J]. Journal of Applied Meteorology, 1984, 23: 1100-1109.

[9] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 423-431. [Wang Lin, Chen Wen. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 423-431.]

[10] 李伟光, 陈汇林, 朱乃海, 等. 标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 178-182. [Li Weiguang, Chen Huilin, Zhu Naihai, et al. Analysis of drought monitoring on Hainan Island from standardized precipitation index [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 178-182.]

[11] 董晓华, 张庆玉, 张特, 等. 三种长期定量降水产品在淮河流域干旱监测中的潜力[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 93-103. [Dong Xiaohua, Zhang Qingyu, Zhang Te, et al. Potential of three long-term quantitative precipitation products of drought monitor-

ing in Huaihe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11): 93-103.]

[12] 马秋梅. 多源卫星降水产品在长江流域径流模拟中的适用性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019. [Ma Qiumei. Applicability of multi-source satellite precipitation products in streamflow modeling in the Yangtze River Basin[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.]

[13] Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al. The global precipitation measurement mission[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95(5): 701-722.

[14] 刘元波, 傅巧妮, 宋平, 等. 卫星遥感反演降水研究综述[J]. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1162-1172. [Liu Yuanbo, Fu Qiaoni, Song Ping, et al. Satellite retrieval of precipitation: An overview[J]. Advances in Earth Sciences, 2011, 26(11): 1162-1172.]

[15] Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(1): 38-55.

[16] Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(3): 487-503.

[17] 邓越, 蒋卫国, 王晓雅, 等. MSWEP降水产品在中国大陆区域的精度评估[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 455-464. [Deng Yue, Jiang Weiguo, Wang Xiaoya, et al. Accuracy assessment of MSWEP over mainland China[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 455-464.]

[18] Beck H E, Wood E F, Pan M, et al. MSWEP V2 global 3-hourly 0.1° precipitation: Methodology and quantitative assessment[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 473-500.

[19] Xu Z G, Wu Z Y, He H, et al. Evaluating the accuracy of MSWEP V2.1 and its performance for drought monitoring over mainland China[J]. Atmospheric Research, 2019, 226: 17-31.

[20] Guo H, Li M, Nzabarinda V, et al. Assessment of three long-term satellite-based precipitation estimates against ground observations for drought characterization in northwestern China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 828, doi: 10.3390/rs14040828.

[21] 石琳, 杨春生, 卫林勇, 等. IMERG卫星降水产品实时监测黄河流域干旱效用分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(6): 9-11, 24. [Shi Lin, Yang Chunsheng, Wei Linyong, et al. Utility analysis of IMERG satellite precipitation product for real-time drought monitoring over the Yellow River Basin[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(6): 9-11, 24.]

[22] 梁守真, 隋学艳, 王猛, 等. 基于SPEI的黄河流域多时间尺度干湿变化分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 231-241. [Liang Shouzhen, Sui Xueyan, Wang Meng, et al. Multiple time scales analysis of dryness and wetness changes of the Yellow River Basin in the past 50 years based on SPEI data[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 231-241.]

[23] 周帅, 王义民, 畅建霞, 等. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1231-1241. [Zhou Shuai, Wang Yimin, Chang Jianxia, et al. Research on spatio-temporal evolution of drought patterns in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10): 1231-1241.]

[24] 曹闯, 任立良, 刘懿, 等. 基于联合干旱指数的黄河流域干旱时空特征[J]. 人民黄河, 2019, 41(5): 51-56. [Cao Chuang, Ren Liliang, Liu Yi, et al. Spatial-temporal characteristics of drought of the Yellow River Basin based on joint drought index[J]. Yellow River, 2019, 41(5): 51-56.]

[25] Zhong R, Chen X, Lai C, et al. Drought monitoring utility of satellite-based precipitation products across mainland China[J]. Journal of Hydrology, 2018, 568: 343-359.

[26] GB/T 20481-2017. 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [GB/T 20481-2017. Grades of meteorological drought[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]

[27] 李斌, 李丽娟, 李海滨, 等. 澜沧江流域干旱变化的时空特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 87-92, 393. [Li Bin, Li Lijuan, Li Haibin, et al. Spatial and temporal variability of droughts in the Lancang River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 87-92, 393.]

[28] 张世喆, 朱秀芳, 刘婷婷, 等. 基于多维Copula的中国干旱特征及危险性分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 333-345. [Zhang Shizhe, Zhu Xiufang, Liu Tingting, et al. Drought characteristics and risk hazard in China based on multidimensional Copula model [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 333-345.]

[29] 邱德勋, 穆兴民, 尹殿胜, 等. 大理河流域干旱变化特征及其与极端降水的关系[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1240-1249. [Qiu Dexun, Mu Xingmin, Yin Diansheng, et al. Variation characteristics of drought and its relationship with the extreme precipitation in Dali River Basin[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1240-1249.]

[30] 王晓峰, 张园, 冯晓明, 等. 基于游程理论和Copula函数的干旱特征分析及应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 206-214. [Wang Xiaofeng, Zhang Yuan, Feng Xiaoming, et al. Analysis and application of drought characteristics based on run theory and Copula function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 206-214.]

[31] Guo H, Bao A, Ndayisaba F, et al. Space-time characterization of drought events and their impacts on vegetation in Central Asia[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 1165-1178.

[32] 彭振华, 李艳忠, 余文君, 等. 遥感降水产品在中国不同气候区的适用性研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(7): 1296-1311. [Peng Zhenhua, Li Yanzhong, Yu Wenjun, et al. Research on the applicability of remote sensing precipitation products in different climatic regions of China[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(7): 1296-1311.]

Applicability evaluation of MSWEP product for meteorological drought monitoring in the Yellow River Basin

XU Xintong, ZHU Li, LYU Xiaoyu, GUO Hao
(School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276826, Shandong, China)

Abstract: This study aims to evaluate the accuracy of the multi-source weighted-ensemble precipitation (MS WEP) product for drought monitoring in the Yellow River Basin of China from 1981 to 2020 using several statistical indicators and the standardized precipitation index (SPI) with multiple time scales. The run theory was used to identify drought events and quantitatively analyze their spatial and temporal characteristics. The following results are presented. (1) The monthly precipitation from the MSWEP product is well correlated with that from the ground observation represented by the Chinese precipitation analysis product (CPAP), and the determination coefficient reaches 0.9347. (2) The MSWEP product could successfully capture the spatial pattern and temporal evolution of multiyear precipitation. (3) The SPI calculated on the basis of the MSWEP product could generally reproduce the SPI pattern calculated on the basis of CPAP. However, the correlations differ from region to region. MSWEP product has a satisfactory performance in the middle and lower reaches of the river basin despite its poor performance in capturing the wetness or dryness condition in the source area of the Yellow River Basin with correlation coefficients lower than 0.5. Notably, the capability of the MSWEP product for capturing drought decreases with the increase in the SPI time scales. (4) The performance of the MSWEP product in the middle and lower reaches of the watershed is significantly better than that in the upper reaches. (5) MSWEP product can effectively capture the characteristics of drought events, such as duration, intensity, and severity. Thus, the MSWEP product is generally suitable for drought monitoring in the middle and low reaches of the Yellow River Basin. However, further correcting the overestimation error of precipitation in the application of MSWEP in areas with complex terrain in the source region of the Yellow River Basin is necessary.

Key words: drought monitoring; multi-source weighted-ensemble precipitation (MSWEP) product; standardized precipitation index; applicability evaluation; Yellow River Basin